

## 요크 형상 변화에 따른 EV-Relay 구동용 액츄에이터의 동작특성 연구

박국남\*, 주현우\*, 박홍태\*  
LS산전\*

### Dynamic Characteristics of a Actuator for Driving EV-Relay as Yoke Shape

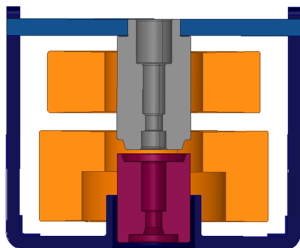
Kug-Nam Park\*, Hyun-Woo Joo\*, Hong-Tae Park\*  
LSIS\*

**Abstract** - 본 논문은 Yoke 형상 변화에 따른 EV-Relay 구동 액츄에이터의 동작특성에 대해 연구하였다. 요크는 기본 형상을 포함하여 3가지 형태이며, 각 형상에 대해 유한요소해석으로 동작특성을 계산하였다. 계산시간 단축을 위해 2차원 축대칭 모델을 이용하였고, 기계적 부하를 동작특성 계산과정에 포함하여 실제동작상태와 유사하게 표현하였다. 마지막으로, 요크 형상에 따른 3가지 모델의 계산결과를 비교하여 기존 모델보다 형상이 변화된 모델의 동작특성이 개선되었음을 확인하였다.

#### 1. 서 론

전기 자동차는 기존의 내연 기관을 사용하지 않고, 전기 모터로 구동되는 무공해 운송수단이다. 전기 모터는 차량 내부의 배터리 팩에서 전력을 공급받으며, 그 내부에는 EV-Relay가 배치되어 배터리 팩과 차량 내부 시스템 간의 전기적 스위치 역할을 수행한다. EV-Relay는 크게 소호부와 액츄에이터로 나뉘는데, 소호부는 배터리 팩에서 발생하는 DC 전력을 개폐하는 역할을 하며, 액츄에이터는 소호부 내부에 위치한 접점을 동작시키는 구동부 역할을 한다 [1].

<그림 1>은 EV-Relay용 액츄에이터의 구조를 나타낸다. Winding(권선), Moving Core(가동자), Fixed Core(고정자), Yoke(요크)로 구성되며, 가동자가 위·아래로 동작하여 소호부의 접점을 투입·개방시킨다.



<그림 1> 액츄에이터 구조

본 논문은 Yoke 형상 변화에 따른 EV-Relay 구동 액츄에이터의 동작특성에 대해 연구하였다. 기존 모델을 포함한 3가지 모델에 대해 유한요소해석을 실시하였고, 기존 모델과 요크형상 변화모델의 동작특성을 비교하였다. 조립성에 영향을 미치지 않는 조건하에 형상을 변화시켰으며, 스프링 하중을 계산과정에 고려하여 실제 조건과 유사하게 표현하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 유한요소 방정식

###### 2.1.1 전기회로 방정식

전압이 인가되었을 때 액츄에이터의 전기회로 방정식을 나타내면 식 (1)과 같다.

$$V = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

$V$  는 인가전압,  $R$  은 권선의 저항,  $i$  는 여자전류,  $L$  은 권선의 인덕턴스,  $\lambda$  는 쇠교자속량을 나타낸다.

###### 2.1.2 자계 지배 방정식

권선에서 발생한 자기장으로 액츄에이터의 가동자는 동작한다. 자계의 시간적 변화를 고려한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{H} \right) + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V = \vec{J}_o \quad (2)$$

$\mu$  는 투자율,  $\vec{H}$  는 자계의 세기,  $\vec{A}$  는 자기 벡터 포텐셜,  $\sigma$  는 도전율,  $V$  는 스칼라 포텐셜,  $\vec{J}_o$  는 입력전류밀도를 나타낸다 [2].

###### 2.1.3 운동 방정식

액츄에이터의 기계적 동작은 가동자의 운동방정식을 계산하여 구할 수 있다. 변위 방향인  $z$  축으로 상·하 운동을 할 경우 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_{mag} + F_{load} \quad (3)$$

$m$  은 가동자의 질량,  $z$  는 변위,  $F_{mag}$  는 이동부에 발생하는 힘,  $F_{load}$  는 스프링에 의한 힘을 나타낸다.

###### 2.1.4 전자력 계산

본 논문에서는 가상변위법을 사용하여 전자력을 계산하였다. 가상변위법은 에너지를 기본으로 전자력을 계산하는 방법으로  $z$  방향으로의 전자력  $F$  는 자계에너지  $W$  를 미분하여 구한다. 이 때 가동자에 작용하는 전자력  $F_{mag}$  를 구하면,

$$F_{mag} = - \frac{\partial}{\partial z} \frac{B^2 S}{2 \mu_0} \quad (4)$$

$F$  는 가동자에 작용하는 힘,  $B$  는 공극에서의 자속밀도,  $\mu_0$  는 공기의 투자율,  $S$  는 가동자의 넓이를 나타낸다.

##### 2.2 유한요소해석

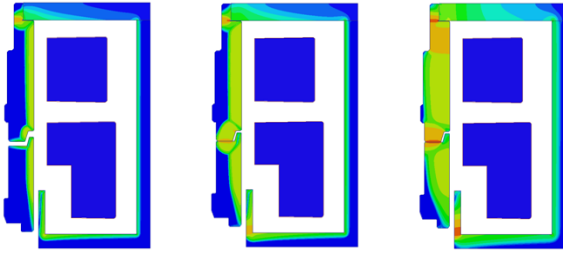
###### 2.2.1 기본모델의 자속밀도분포

<표 1> 해석조건

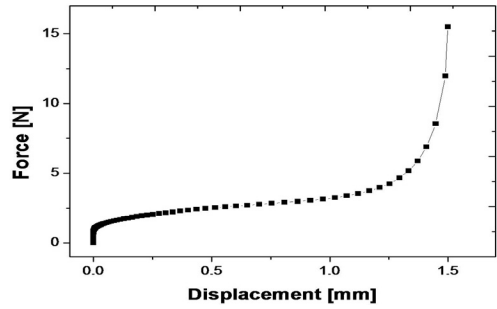
인가전압	12[V <sub>dc</sub> ]
권선저항	32[Ω]
턴 수	1620

기본적인 해석조건 <표 1>과 같다. 전압원에 의해 전류가 발생하면 자로를 통해 자속이 순환한다. 자로는 가동자, 고정자, 요크로 이루어지며, 권선에서 발생한 기자력이 증가하여 스프링에서 발생하는 힘을 이겨내면 가동자는 동작을 시작한다. 주행 중에는 가동자와 위로 움직여 접점을 맞닿게하고, 비주행시에는 액츄에이터의 가동자가 스프링에 의해 초기 위치로 돌아가 접점을 분리시킨다.

<그림 2>는 시간에 따른 자속밀도분포를 보여준다. 각 요소의 맞는 부분 및 'L'자 형태의 요크에 자속이 집중되는 것을 확인할 수 있다.



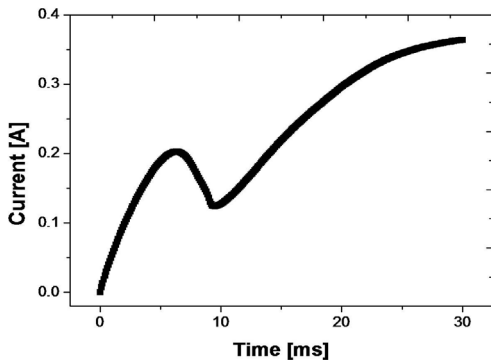
<그림 2.1> 4[ms] <그림 2.2> 8[ms] <그림 2.3> 20[ms]  
<그림 2> 시간에 따른 자속밀도분포



<그림 5> 힘-변위 곡선

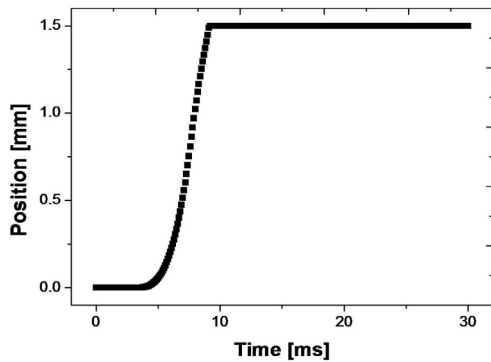
### 2.2.2 기본모델의 동작특성

<그림 3> - <그림 5>은 기본모델의 동작특성을 나타낸다. 요크 형상을 변화시킨 모델은 힘·전류의 크기 및 동작시간에 차이가 있을 뿐 전체적인 파형이 유사하므로, 기본모델의 파형만을 논문에 나타내었다. <그림 3>은 기본모델의 전류 파형을 보여준다. 전류는 7-10[ms] 구간동안 감소하는 경향을 가지는데 이는 가동자가 동작을 시작하여 역기전력이 증가했기 때문이다. 가동자가 동작을 완료하여 역기전력이 감소하게 되면 전류는 다시 증가하며, 전류 포화구간인 30[ms] 이후에 발생하는 힘이 액츄에이터가 발생시킬 수 있는 전체 힘이다.



<그림 3> 권선의 전류 파형

<그림 4>은 가동자의 변위를 보여준다. 가동자의 변위는 1.5[mm]이며, 동작완료시간은 9.2[ms]이다. 실제동작 시에는 접점에서의 충격으로 인해 약간의 반동 현상이 액츄에이터에서 발생한다.



<그림 4> 가동자의 변위

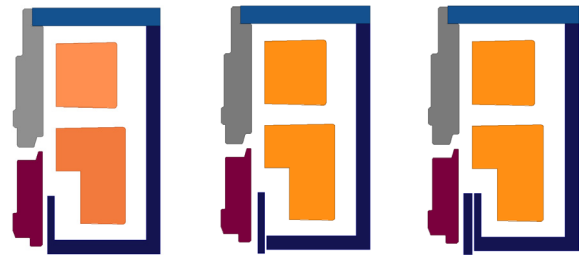
<그림 5>는 기본모델의 힘-변위 곡선을 나타낸다. 가동자의 변위가 변화함에 따라 힘이 증가하며, 변위의 마지막 구간에서는 힘이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

변위 초기에는 스프링 하중이 1개만 작용하여 부하력이 크지 않지만, 2번째 스프링이 작용하는 위치에서는 힘이 급격하게 증가하기 때문에 액츄에이터의 힘이 부족해 오동작이 발생할 수 있다. 두 번째 스프링이 작용할 때의 힘을 잘 고려해 설계해야 액츄에이터가 오동작 하는 것을 방지할 수 있다. 전류가 포화구간에 들어서면 액츄에이터는 충분한 힘을 발생시키기 때문에 변위의 마지막 부분에서의 힘은 대부분의 경우 부하력보다 크게 된다.

### 2.2.3 Yoke 형상에 따른 동작특성

조립성에 영향을 미치지 않는 조건하에서 요크의 형상을 변화시킨다. 동작특성 개선을 위해 적용 가능한 2가지 요크 형상을 <그림 6>에 나타내었다. 기존모델은 현재 적용중인 형상이며, <그림 6.1>, <그림 6.2>는 가동자에 발생하는 힘을 증가시키기 위해 제한한 2가지 형상이다.

본 논문에서는 액츄에이터가 낼 수 있는 최대 힘과 동작 유지에 필요한 최대 전류 값을 비교하여 동작특성이 개선되었는지를 확인하였다.



<그림 6.1> 기본모델 <그림 6.2> Case 1 <그림 6.3> Case 2  
<그림 6> 액츄에이터 요크 형상

Case 1 모델은 하부 요크 간에 공극이 생겨 힘이 기본모델보다 감소하였다. 이를 보완하기 위해 가동자와 요크 사이의 공극 간격을 동일하게 두고 자성체를 하나 더 배치시킨 Case 2 모델은 기본모델보다 힘이 약 2[N] 가량 증가하였다.

전류 값은 동작이 완료된 후 포화구간에서의 값으로 3가지 모델 모두 유사하게 나타났다. 액츄에이터의 사이즈가 정해지면 기본적으로 낼 수 있는 힘이 기자력에 의해 정해지지만, 요크나 가동자의 형상을 변화시켜 힘의 최대치와 파형을 변화시킬 수 있다.

<표 2> 동작특성 비교

	Force [N]	Current [A]
기본모델	40.711	0.364
Case 1	39.775	0.357
Case 2	43.110	0.356

### 3. 결 론

본 논문은 요크 형상 변화에 따른 EV-Relay 구동 액츄에이터의 동작특성에 대해 연구하였다. 기본모델을 포함한 3가지 요크형상에 대해 유한요소해석을 실시한 결과, 전류 피크값은 전체적으로 유사하지만 Case 2모델이 기존모델보다 힘이 6[%]가량 개선되었다. 힘을 키우는 방법에는 기본적으로 기자력을 키우는 방법이 있지만, 공간 및 발열 문제로 이 것이 어렵다면 자로인 요크 형상을 변경하여 힘을 개선하는 방법도 효율적이라 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Hyun-Woo Joo, Young-Hwan Eum, Hong-Tae Park, Seokweon Park "Dynamic Analysis of Linear Electromagnetic Solenoid for Electric Vehicle Relay", XIX ICEM 2010.
- [2] Nicloa Bianchi "Electrical machine analysis using finite elements" Taylor&Francis Group, 2005.